第38卷 第3期
2021年5月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 38 No. 3
May 2021

杭锦后旗不同盐渍土沙穴种植番茄对土壤水热盐的响应

何 婧， 屈忠义， 刘 霞， 刘祖汀， 孙宇乐

（内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院，内蒙古 呼和浩特 010018）

摘 要：河套灌区杭锦后旗各质地盐渍土壤的水分入渗性能、温度及含盐量不同，使土壤改良效果存在差异。为研究“沙穴”种植番茄对不同土质的土壤水分、温度、盐分的迁移规律，通过在土柱中填装3种典型土质（砂壤土、粉壤土、黏壤土），同时布设沙穴，探索在滴灌条件下种植加工番茄以改良不同土壤质地的可行性。结果表明：沙穴种植对不同土质的水热盐迁移影响不同，沙穴种植能显著改善黏壤土土壤水分入渗性能，提高根系层土壤的湿润区面积及含水率，在深度20~40 cm相对增加了24.15%，但降低了砂壤土和粉壤土的保水性，土壤剖面含水率呈上干下湿的特点；沙穴种植可显著提高作物生长初期黏壤土的温度（$P<0.05$），平均增温3.64 ℃，有利于初期幼苗生长发育，但对原状砂壤土和粉壤土的温度变化不显著，生育后期土壤温度随着气温变化均呈下降趋势；沙穴种植对土壤盐分具有淋洗作用，在深度>20 cm处，粉壤土和黏壤土的盐分淋洗效果显著（$P<0.05$），平均相对脱盐率达23.28%和56.29%。综合分析沙穴种植对不同土质盐渍土土壤水热盐迁移规律，得出在杭锦后旗3种典型盐渍土中，黏壤土是最适宜沙穴改良方式的土质。

关键词：沙穴；盐渍土；杭锦后旗；土壤质地；水分运动；温度变化；盐分淋洗；加工番茄

土壤盐渍化是内蒙古河套灌区杭锦后旗主要的农业问题之一，该地区农用地盐渍化严重，微度和轻度盐渍化农用地分布最广，中度以上盐渍化农用地占土地总面积的15.76%，占农用地总面积的25.68%[1]。自20世纪80年代至今，通过对其进行盐渍土壤改良及节水灌溉配套工程的建设，盐渍化土壤已得到一定控制。而灌区内土壤质地的差异，导致盐渍土壤改良效果不一，杭锦后旗内由于土壤母质含盐量大，黏粒和粉粒含量高，导致土壤水分难以向下入渗，盐分相对水分的运移受阻更加明显，难以迁移到深层土壤中[2]，削弱盐分淋洗作用[3-4]，严重制约了当地农业的可持续发展。

“沙穴+滴灌”是在作物根系区开挖圆柱体或者正方体的内槽，利用黏粒含量极少的客土细沙填入后平整，并在上方铺设滴灌带，即客土填沙与滴灌相结合的一种种植灌溉方式[5]。近年来，国内外有关“沙穴+滴灌”对盐碱土改良以及其水盐再分布特征等方面的研究逐渐增加[6]。张体彬等[5-10]通过在宁夏银川平原龟裂碱土采用沙穴种植模式对土壤水盐特征、养分分布及作物生长及产量进行了分析，发现“沙穴+滴灌”能够改善土壤水入渗性能，扩大土水接触面积，有效淋洗根系层土壤盐分，提升土壤肥力，促进作物根系生长，增加作物产量，提高作物品质。Arbel等[6]研究发现，微咸水滴灌下原状土壤中心根区有明显的盐分累积，而沙穴种植下异质土壤间的水力性质差异使毛细管内产生咸水单向流动路径，盐分的累积区远超过根区。目前，有关沙穴种植对盐渍土改良的研究主要集中于宁夏银川平原，并且只针对该地区某一类型土壤进行研究，对河套灌区不同质地盐碱土的改良情况研究较少。盐渍土壤质地是影响土壤结构和性质的主要因素之一，对土壤水、热、盐分布特征具有显著影响。值得注意的是，土壤质地的改变，将直接影响作物的生长发育，特别是在干旱地区，根系土壤水

收稿日期：2020-07-31； **修订日期：**2020-12-07
基金项目：国家自然科学基金项目（41761050，51869019）
作者简介：何婧（1996-），女，硕士研究生，主要从事节水理论与农田水土环境效应研究. E-mail: 649247923@qq.com
通讯作者：屈忠义. E-mail: quzhongyi@imau.edu.cn

分的短缺及盐分累积将会抑制作物生长。为此,本文通过对河套灌区杭锦后旗3种不同质地的原状土及其沙穴种植结构为研究基础,以当地代表性经济作物之一加工番茄为研究对象,探究同一尺度下,沙穴种植对不同土壤质地土壤水热盐迁移规律,旨在评价分析沙穴种植方式对灌区不同质地土壤改善水热条件、促进盐分淋洗效果对改良盐渍土的影响,为"沙穴+滴灌"在河套灌区盐渍土质适宜的改良措施及农业的可持续发展提供科学的指导意义。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

试验于2019年6—10月在内蒙古农业大学海流科技园区室外试验场开展(40°40′51″N,111°22′18″E,海拔1059 m),地处内蒙古高原,阴山山脉中段大青山以南,多年平均降雨集中在7—9月,年平均降雨量为421.6 mm,年平均蒸发量1500~1800 mm以上,多年平均气温7.5 ℃,昼夜温差大,年平均温差8.9 ℃,属于典型温带大陆性气候,多年日照时长3215 h以上,年无霜期平均136 d,平均风速2~3 $m\cdot s^{-1}$。

1.2 试验设计

影响加工番茄生长的主要气象因子为大气温度及降雨量[11],海流科技园区所在范围虽不属于河套平原,但通过分析2010—2019年河套灌区杭锦后旗与海流科技园区月平均气温及降雨量趋势发现,近10 a内月平均气温相差较小为0.97 ℃,降雨量相差2.38 cm,对逐年降雨变化趋势分析可得,相关系数达0.748,说明两个地区降雨时间节点相同,具有相似的降雨规律,故试验区也能够较好反映杭锦后旗气温及降雨变化情况,对作物影响效果相同,具有一定代表性[12]。因此,将杭锦后旗不同质地盐渍土壤带回海流科技园区也能进行试验开展。供试土壤均取自内蒙古河套灌区杭锦后旗3处具有典型的盐碱土样,供试土壤取样点及试验园区位置见图1。根据激光粒度仪HELOS/BR(德国新帕泰克公司)测得各粒径含量,根据美国农业部制土壤质地三角图判断土壤质地,其中盐渍土1为砂壤土,取自临近渠道处农田,盐渍土2为粉壤土,取自康尔徕农业基地,盐渍土3为黏壤土,取自未曾耕作的撂荒滩,供试细沙取自试验区外固定沙丘,其基本理化性质见表1。将杭锦后旗3处典型盐渍土质(砂壤土、粉壤土、黏壤土),结合原状土与沙穴种植两种结构,设计3种质地下两种种植结构,共计6个处理,试验设计见表2。

为确保监测指标精度,控制试验土体的内部环境及稳定性,将作物种植于铁桶土柱内,铁桶土柱规格为60 cm×80 cm(底面直径×高),桶体下设阀门以排出深层渗漏的灌溉水和降水,上方设有滴头,滴头流量为0.38 $L\cdot h^{-1}$,保证灌溉水量均一。据薛铸[10]、张体彬[5]等研究结果,设置直径30 cm,深度20 cm圆柱体沙穴。试验前对3种供试土壤自然风干碾碎后剔除碎石,按容重1.45 $g\cdot cm^{-3}$的沙壤土、粉壤土、黏壤土及1.65 $g\cdot cm^{-3}$的细沙沙粒,每10 cm分层进行填装并进行拉毛工艺,以增加土层间粗糙度,使各层土壤充分接触,桶底设置高10 cm的砂石反滤层,反滤层与供试土壤间用300目尼龙布隔开,避免土壤堵塞反滤层,根据5TE传感器测量要求(监测范围:探头中心周围5 cm处)及试验需要,在土柱垂直方向5 cm、10 cm、15 cm、20 cm、25 cm、35 cm深埋设6支5TE土壤水盐温度传感器,并用智能土体参数测控单元系统(BSI-DS816A2018)采集土壤数据,填装完成后静置7 d以上使桶内土体均匀沉降达到平衡,同时在各生育期内取土,采用烘干法和饱和泥浆法(水土质量比5:1)对土壤含水率和*EC*值进行校正,试验剖面布设如图1所示。

试验于2019年6月初完成搭建及桶体土柱填装工作,借鉴当地田间管理及加工番茄的灌水施肥

表1 土壤性质

Tab. 1 Soil propertie

盐渍土及细沙	机械组成/%			土壤质地	$EC_{(1:5)}$/($\mu S\cdot cm^{-1}$)	pH
	黏粒 0.05~2 mm	粉粒 0.002~0.05 mm	砂粒 <0.002 mm			
盐渍土1	1.51	48.09	50.4	砂壤土	266.37	8.95
盐渍土2	8.16	78.64	13.2	粉壤土	2669.97	8.52
盐渍土3	27.07	56.64	16.29	黏壤土	1708.03	10.49
换沙(细沙)	0.16	4.72	95.12	砂土	133.53	7.72

表2　试验设计处理

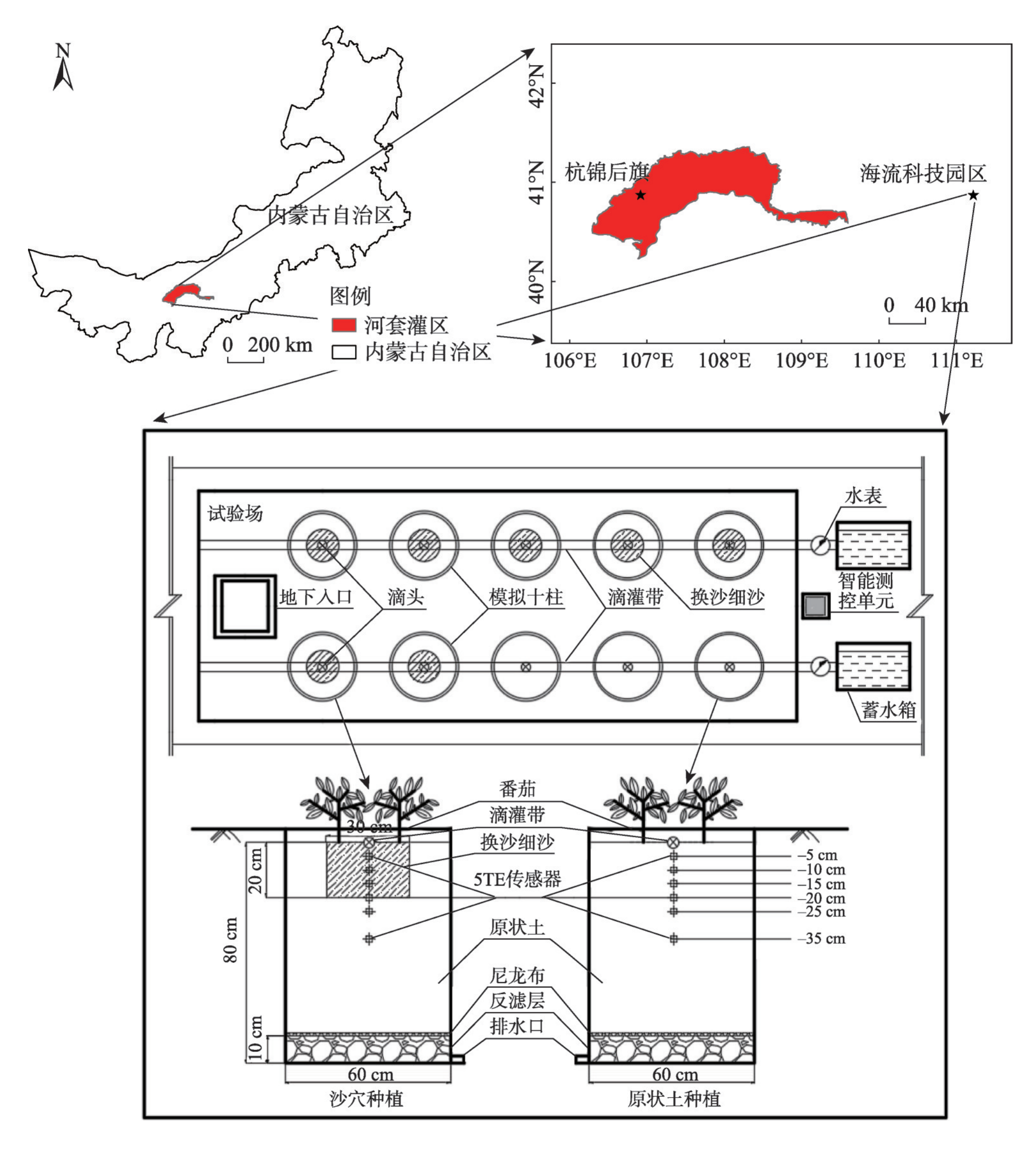
Tab. 2　Treatment of test design

处理	土壤种植结构	土壤质地	重复
S	原状土	砂壤土	1
SS	沙穴	砂土+砂壤土	2
L	原状土	粉壤土	1
SL	沙穴	砂土+粉壤土	2
C	原状土	黏壤土	1
SC	沙穴	砂土+黏壤土	3

管理制度[8, 13-16]，依据天气，土地准备情况、加工番茄的熟性确定移栽时间为6月18日，品种为屯河16号，移栽后及时检查封土情况，6月21日滴缓苗水，以确保其成活率，苗期用KH_2PO_4（0.2%~0.3%）、CH_4N_2O（0.2%）及$ZnSO_4$（0.05%）混合液喷施2~3次，促进花芽分化，调节前期水肥需求，开花—坐果期用KH_2PO_4（0.2%~0.3%）喷施2~3次，减轻棉铃虫对果实危害，提高番茄坐果率。生育期内灌水量、施肥量依据生育期内作物需水量进行划分，其中供试氮肥为尿素$CO(NH_2)_2$（N：46%），磷肥为磷酸一铵$NH_4H_2PO_4$（P_2O_5：60%），钾肥为氯化钾KCl（K_2O：57%），施肥方式以基肥深施，追肥随水滴施相结合，施肥量及灌水、施肥次数见表3。每个桶内移植两株，各处理均采用相同的灌水施肥处理，10月中旬成熟收获，全生育期共计118 d。

1.3　观测内容及指标分析方法

该试验站设置自记式农业气象站，可自动监测



注：以审图号为GS(2019)3333号的标准底图作图，无修改。

图1　研究区位置及土柱剖面示意图

Fig. 1　Location of study area and soil column profile

表3　加工番茄生育期灌溉制度

Tab. 3　Irrigation system of processing tomato in growing period

生育期	时间/月-日	灌溉、施肥周期/d	灌溉、施肥比例/%	灌溉、施肥次数
移栽—现蕾期	06-18—06-30	13	12.5	1
现蕾—开花期	07-01—07-10	10	12.5	1
开花—坐果期	07-11—07-23	13	25	2
坐果—始熟期	07-24—09-17	56	30	3
始熟—终收期	09-18—10-12	26	20	2
全生育期		118	100	9

降雨量、气温、风速、空气湿度等常规气象资料，每隔30 min自动监测气象变化，每日取平均值，试验期间降雨量与气温变化如图2所示。通过对2010—2019年试验区年降雨量及平均气温变化分析，2019年试验区年平均气温7.47 ℃，较常年低0.1 ℃，年降雨量412.2 mm，较常年少9.4 mm，是近10 a以来第5个偏少年，高于2011年（177.1 mm），2017年（325.3 mm），2015年（361.9 mm），2014年（394.8 mm）属平水年。

从2019年6月18日至10月12日采用对5TE传感器加工番茄全生育期土壤水热盐迁移变化情况进行了连续监测，在生育初、末期对5 cm、10 cm、15 cm、20 cm、25 cm、35 cm取样，各层土壤取3次重复。5TE传感器将EC-5与ECH$_2$O-TE相结合，与其有着相同的理论基础，可同时测定土壤水分含量、温度和电导率，其各项指标的测量原理、范围、分辨率和精度见表4。

通过土体记录单元（西安碧水环境新技术有限公司制）逐时监测土壤含水量、温度及电导率。在生育期为了使电导率准备的表征土壤Bulk EC值不受温度的影响，需对体积电导率进行温度补偿。目前通用的温度补偿公式采用以下公式，补偿到标准温度25 ℃：

$$\sigma_b = \frac{\sigma'_b}{1+\alpha(T-T_0)} \tag{1}$$

式中：σ_b为补偿后土壤Bulk EC值（dS·m^{-1}）；σ_b'为5TE测得土壤Bulk EC值（dS·m^{-1}）；α为温度补偿系数，本次试验取0.017；T为实测温度，℃；T_0为标准温度，取25 ℃通过修正后土壤Bulk EC值计算沙穴及原状土种植下土壤脱盐率及沙穴相对原状土种植的相对脱盐率，用来评价沙穴对原状土的盐分淋洗效果。

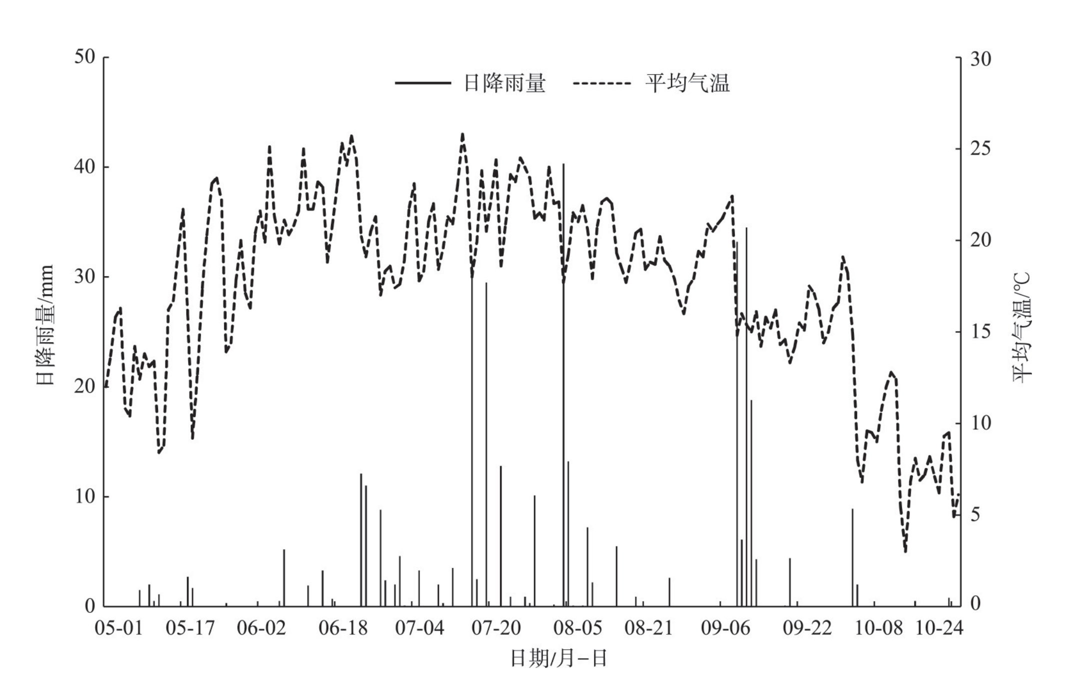


图2　试验区日降雨量及平均气温

Fig. 2　Daily rainfall and average temperature in study area

表4 5TE传感器的技术指标

Tab. 4 Technical specifications of sensors of 5TE

参数	测量原理	振荡电磁波/MHZ	测量范围	分辨率		精度
体积含水率 VWC/%	通过探针测量土壤的介电常数进行TOPP方程换算得体积含水率	70	0~50	1~20 20~80	0.1 <0.75	溶液电导率<10 mS·cm⁻¹,精度±3%
温度 *T*/℃	通过安装在表面的热敏电阻测定温度	70	-40~60	0.1		0.1 ℃
电导率 Bulk *EC*/(dS·m⁻¹)	通过两个电极施加变换的电流,测定电极间的抗阻得出	70	0~23	0~7 7~23	0.01 0.05	0~7,±10% >7,用户校准

(1) 土壤脱盐率

将生育期末各深度处土壤电导率与初始土壤 *EC* 值相减,再除以初始土壤 *EC* 值,得到生育期土壤脱盐率。即:

$$D=(EC_0-EC_i)/EC_0 \quad (2)$$

式中:D 为土壤脱盐率,$D<0$ 时土壤盐分淋洗,$D>0$ 时土壤盐分累积;EC_0 为土壤初始电导率;EC_i 为生育期的土壤电导率。

(2) 土壤相对脱盐率

将生育期末不同深度处沙穴种植与原状结构土壤脱盐率值相减,得到沙穴相对原状结构土壤脱盐率。即:

$$R_r=D_s-D_{CK} \quad (3)$$

式中:R_r 为相对脱盐率,$R_r>0$ 时土壤盐分相对淋洗,$R_r<0$ 时土壤盐分相对累积;D_{CK} 为原状结构土壤脱盐率;D_s 为沙穴种植土壤脱盐率。

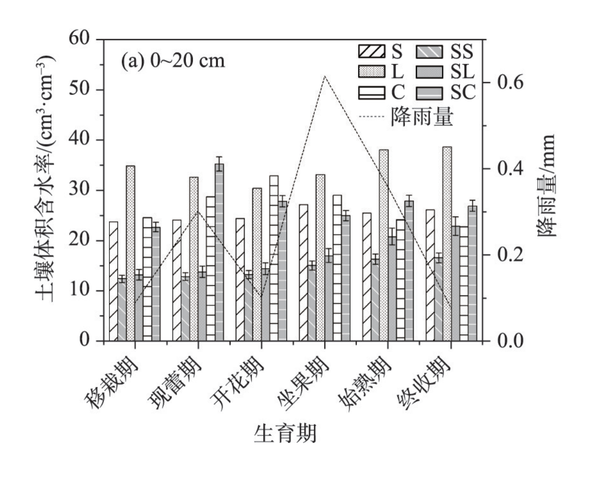
1.4 数据分析

将所采集土壤含水率、土壤温度、土壤 Bulk *EC* 值数据保留至0.01,土壤含水率采用烘干法进行修正,温度补偿后的土壤 Bulk *EC* 采用饱和泥浆法(水土质量比5:1)修正,设计重复处理的数据取其均值,同时对柱状图绘制误差线。采用 Microsoft Excel 2010进行数据整理分析,采用 Origin 2018软件绘制折线图及柱状图,Surfer 12.0软件绘制等值线图,应用 SPSS 20.0软件中的 Duncan 新复极差法进行差异显著性检验($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 沙穴种植下土壤水分动态变化

2.1.1 生育期内土壤水分变化 为探究不同土质沙穴种植对作物土壤含水率的动态变化规律,对生育期根系层0~20 cm、20~40 cm的土壤含水率进行了分析,从图3中可看出,土层20~40 cm的土壤含水率明显高于0~20 cm,同时沙穴种植土壤平均含水率明显低于原状结构。不同生育期内土壤含水率变化存在差异,主要与降雨、灌溉、作物生长情况及作物需水量等有关,在移栽期,番茄植株较小,作物需水量小,各处理的土壤含水率均较低;现蕾期灌水及降水量增加,各处理间土壤含水率均增加,开花期番茄各项生长指标增加,同期灌水量增加而降



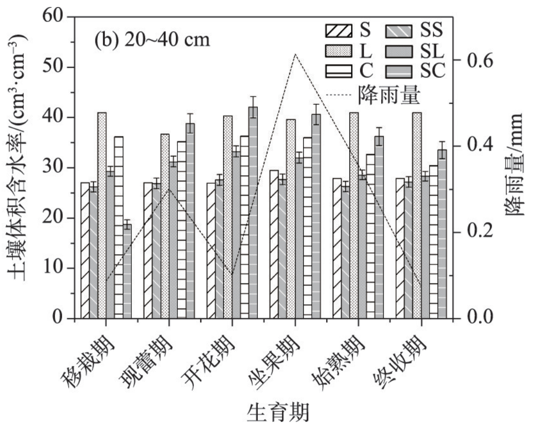


图3 不同处理下全生育期内土壤含水率动态变化

Fig. 3 Dynamic changes of soil moisture content on different treatments during whole growth period

雨量减少,作物需水量增加,土壤含水率略有降低,坐果期灌水及降雨量增加,但此阶段番茄生长旺盛,作物需水量持续增加,故土壤含水率增幅较小,始熟期和终收期灌水及降雨量减少,加工番茄需水量也降低,因而土壤含水量变化幅度不大。全生育期相对于砂质壤土(S)、粉壤土(L)、黏壤土(C)的原状土,沙穴种植下土壤含水率在20~40 cm相对增加了-2.55%,-23.63%,12.00%,说明沙穴种植较砂质壤土(S)及粉壤土(L)原状土种植的土壤含水率在耕作层呈减少趋势,而沙穴种植下黏壤土的含水率略有增加,外界的灌溉、降雨量变化及作物本身生长情况对沙穴种植下土壤含水率增减幅度较原状结构敏感。

2.1.2　土壤水分时空变化特征　垂直方向上5 cm、10 cm、15 cm、20 cm、25 cm、35 cm处为土壤水分活跃层,绘制各土层处土壤含水率变化如图4所示。不同处理下土壤水分随灌溉及降水脉动呈波动变化,随着深度的增加,波动幅度逐渐降低,表现为作物生长初期较高,在生长中后期出现消耗。沙穴对不同质地原状土种植下土壤水分变化存在差异,主要表现对比C处理,SC处理可提高耕层15~35 cm处土壤水分,此时土壤水分变化趋势呈滞后性,而其他沙穴种植对耕层土壤水分呈降低趋势,土壤体积含水率整体变化趋势较为一致。

垂直方向上土壤含水率绘制等值线时空动态变化特征如图5所示阴影部分为沙穴种植。在全生育期内对比原状土壤,SS、SL、SC沙穴种植处理在土层20 cm处土壤水分变化显著,土层25 cm处的土壤含水率和20 cm相比增幅为113.36%、40.93%、24.15%。播种后15~75 d,降雨及灌水量增加,土壤表层(0~10 cm)下的各处理土壤含水率高于生育期其余时间,原状土含水率高于沙穴种植,播种75 d后,降雨量及灌水量减少,土壤表层含水率降低,且在播种后100 d左右C处理土壤含水率变化梯度大,而沙穴SC处理在深度>30 cm处含水率变化梯度较小,土壤含水率相对C处理增加。说明沙穴种植结构可改善黏壤土剖面结构,从而影响土壤的水分分布,而砂质壤土和粉壤土剖面土壤水主要分布在换沙区域的下方,根系层土壤水分空间分布为上干下湿的特点。

2.2　沙穴种植下土壤温度动态变化

由图6可知,在移栽期S处理与SS处理间表层土壤温度无显著差异,L处理与SL处理土壤温度相当,各土层深度差异不显著,C处理和SC处理间各层深度土壤差异显著,沙穴对原状土种植的土壤温度分别增加了3.45 ℃、3.00 ℃和3.47 ℃;在现蕾期S

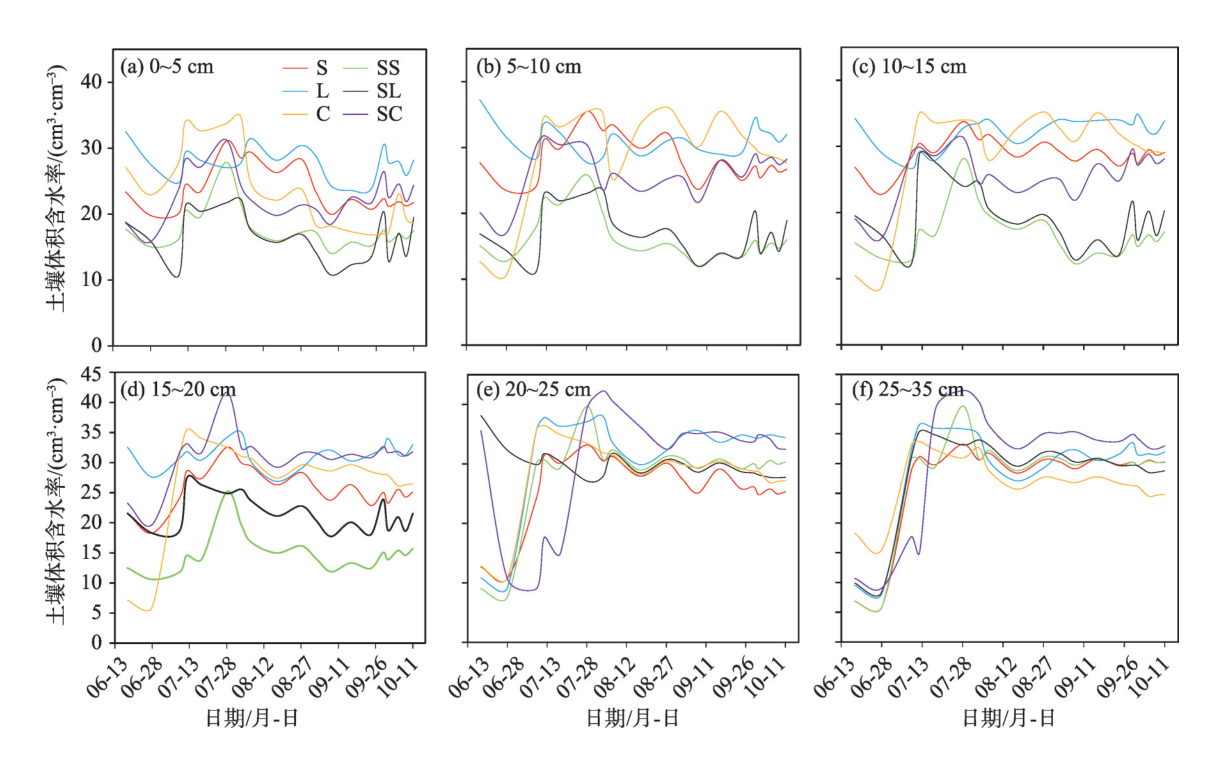
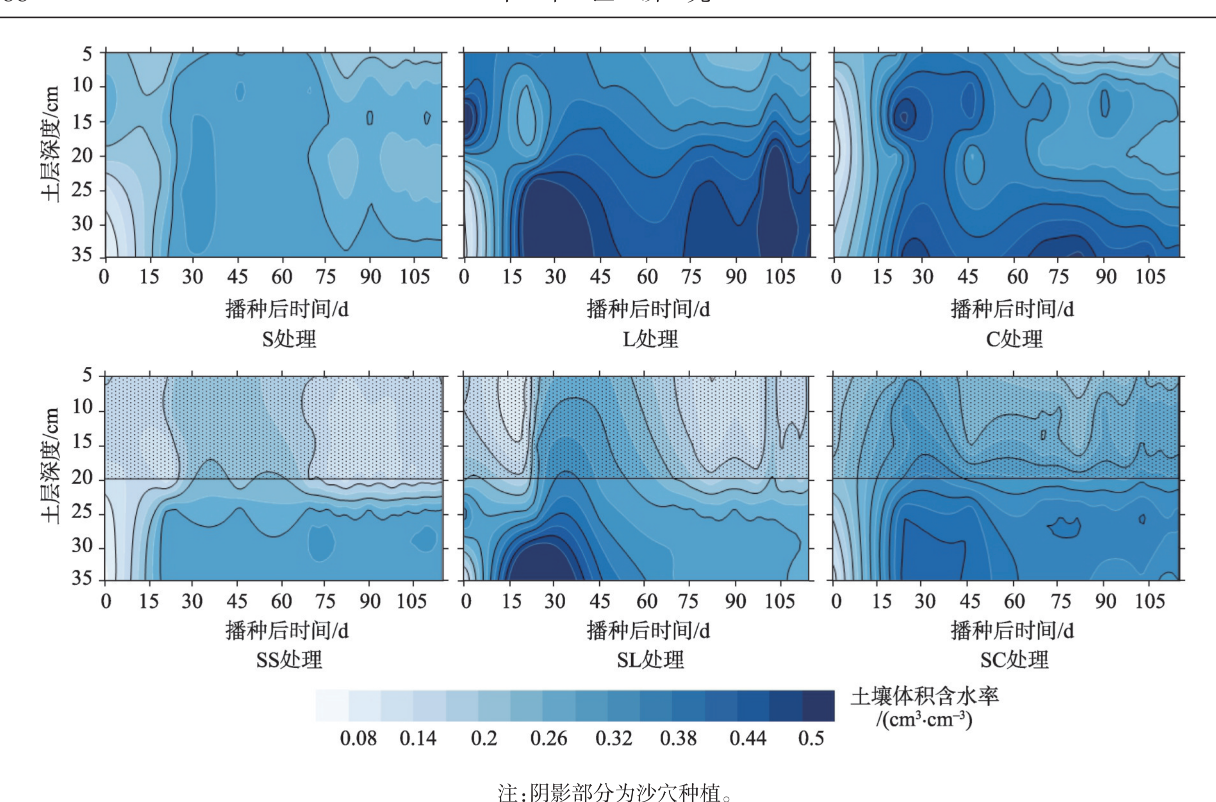


图4　不同处理下土壤各土层深度土壤含水率变化

Fig. 4　Different soil moisture content on different soil depth treatments



注：阴影部分为沙穴种植。

图5　不同处理下土壤水分时空分布

Fig. 5　Temporal and spatial distribution of soil moisture on different treatments

处理与SS处理，L处理与SL处理下各深度土壤温度无显著差异，C处理与SC处理之间在0~20 cm土壤温度差异显著，土壤温度增加了2.41 ℃，在20~40 cm深度处土壤温度无显著差异，说明沙穴可显著提高原状黏壤土种植下作物的生育前期土壤温度，为番茄幼苗的生长提供适宜土壤温度条件；在开花期，对比S、L、C处理，SS、SL、SC处理在0~20 cm处土壤温度分别升高0.56 ℃、2.77 ℃及0.37 ℃，而在20~40 cm处升高-0.21 ℃、3.21 ℃、-0.23 ℃，此阶段外界气温较高，而有研究表明[17]，土壤温度过高不利于作物正常的生长发育，减缓作物代谢过程，降低作物对水分和养分的吸收利用，从而降低产量，对比各沙穴种植，黏壤土能够减缓土壤增温，为番茄正常生长提供良好温度环境；从坐果期到始熟期，此时外界气温降低，同时受作物蒸腾作用增加了近地面的相对湿度，使土壤温度降低，期间各处理沙穴种植土壤温度显著低于原状结构；终收期各处理间变化更为显著，对比S、L、C处理，SS、SL、SC处理的土壤平均温度分别降低了1.36 ℃、0.67 ℃和1.57 ℃。说明受气温、土质及作物蒸腾作用影响，在

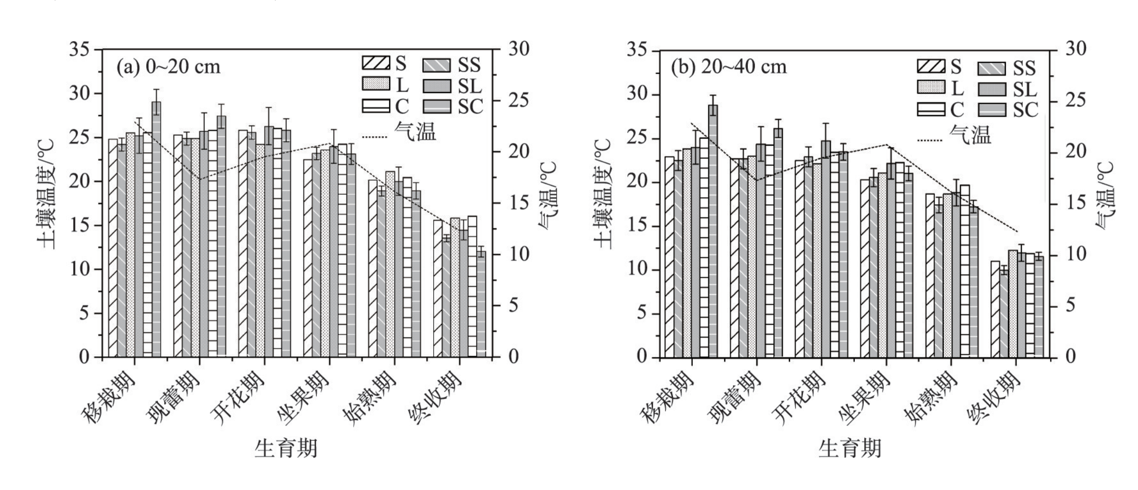


图6　不同处理下全生育期内土壤温度动态变化

Fig. 6　Dynamic changes of soil temperature on different treatments during whole growth period

作物生长初、中期,SL、SC处理的土壤温度明显高于L、C处理,为作物生长提供适宜的温度条件,在作物生长中期至末期,气温降低,沙穴种植土壤温度受大气温度变化较原状敏感,同时作物7蒸腾作用增强,近地面土壤相对湿度增加,SS、SL、SC处理土壤温度明显低于S、L、C处理,综合分析,沙穴种植在原状黏壤土的土壤温度能相对稳定的状态。

2.3 沙穴种植下土壤*EC*值动态变化

2.3.1 土壤*EC*值时空变化特征　根据垂直方向上(5 cm、10 cm、15 cm、20 cm、25 cm、35 cm)处的土壤Bulk *EC*值变化趋势,绘制各土层处土壤含水率变化如图7所示。随着土壤深度的增加,土壤Bulk *EC*波动幅度降低,且与土壤初始*EC*值大小相关,在土壤结构为异质土层(0~20 cm)处,L与C处理下土壤盐分变幅大,随着土层深度的增加呈逐渐累积的状态,在原状土层(20~35 cm)处,除L处理外,土壤*EC*值呈现为先增加后减小的趋势,但整体仍呈积盐现象,同时沙穴对比原状土种植的土壤盐分变化明显,主要表现在SL、SC处理对L、C处理的土壤相对脱盐率分别为1.99和0.78,说明土壤盐分变幅随深度的增加逐渐变小,同时沙穴种植可提高根层土壤盐分淋洗效果。

土壤剖面*EC*值随时间的动态变化特征如图8所示,纵观不同处理的土壤*EC*值的变化情况,S处理与SS处理各不同土层土壤*EC*值较低,且无明显规律。在开花期和坐果期,L处理的土壤*EC*值明显高于其他处理,等值线分部较密集,说明土壤*EC*值变化梯度较大,主要集中在深度20 cm以下,且高于初始值,而SL处理的土壤*EC*等值线分部较均匀,变化梯度较小,在深度35 cm内土壤*EC*值均低于初始值。C处理土壤电导率值呈现逐渐下降趋势,但表层5 cm处土壤*EC*值高于其他处理,而SC处理土壤电导率变化平缓,低于初始电导率。在播种80 d之后,L处理土壤电导率呈现先上升后下降趋势,C处理土壤电导率呈现先下降后略有上升状态,而SL与SC处理的土壤电导率值变化均不显著,说明沙穴种植的粉壤土和黏壤土的可显著降低根系层土壤*EC*值,使各层土壤盐分保持在低盐状态。

2.3.2 沙穴结构对土壤脱盐效果的影响　为进一步探求沙穴种植下各层土壤脱盐情况,在生育初、末期对5 cm、20 cm、35 cm取土测量土壤*EC*值并做统计分析(表5)。由表5可知,沙穴种植SS、SL、SC处理平均脱盐率依次为19.04%、19.14%、27.15%,原状结构S、L、C处理平均脱盐率依次为−6.07%、−31.09%、−11.80%,说明原状处理土壤盐分均呈累积状态。同一土层沙穴与原状各处理的土壤脱盐率均呈显著性差异($P<0.05$),各处理不同土层深度的相对脱盐率均大于0,大小依次为SL>SC>SS,不

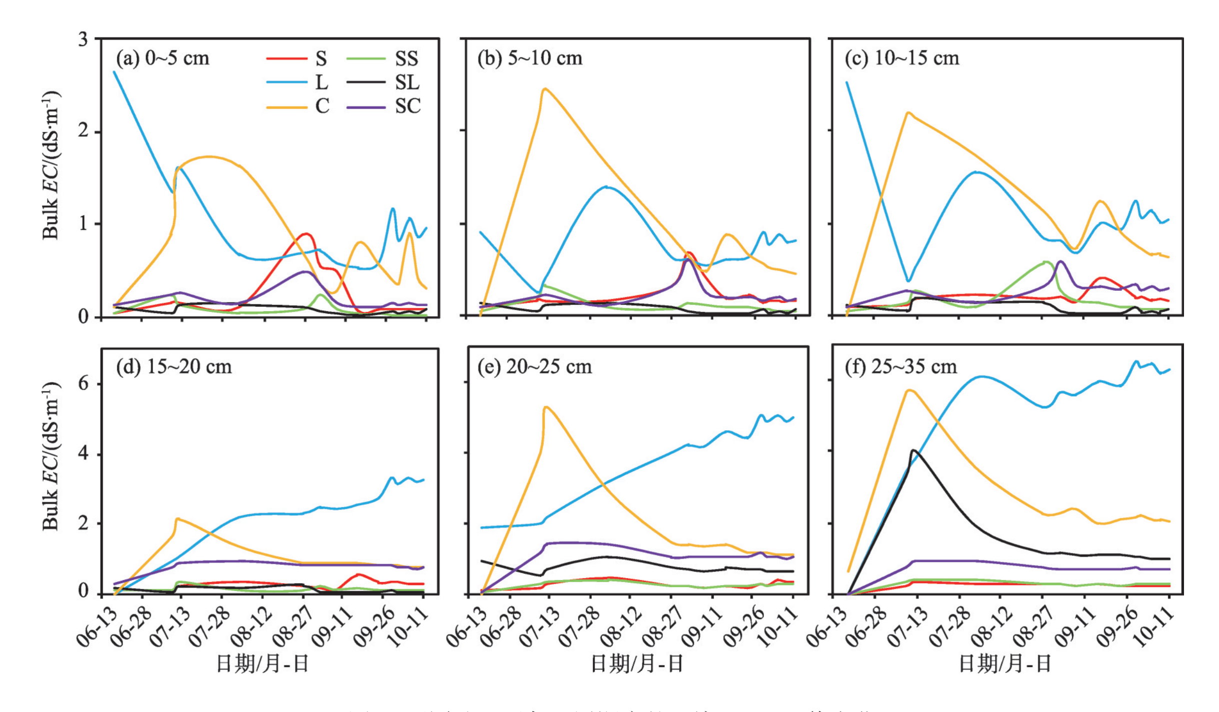
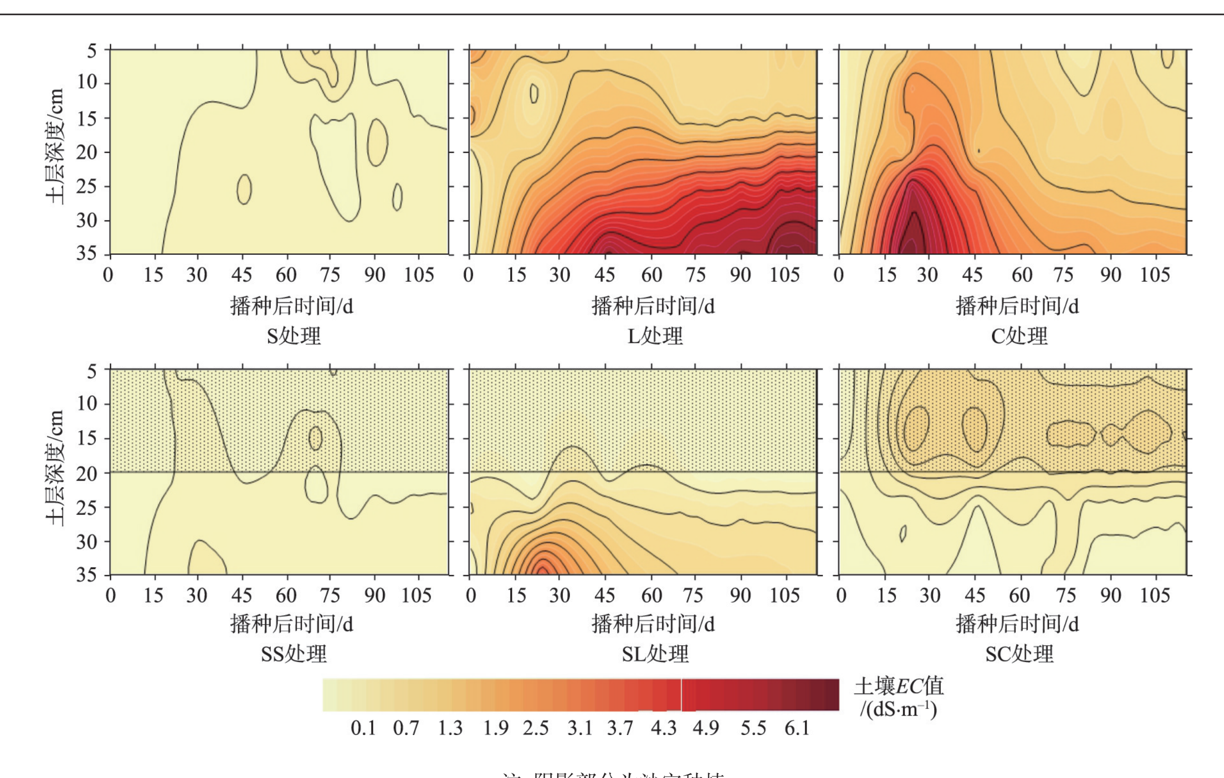


图7　不同处理下各土层深度的土壤Bulk *EC*值变化

Fig. 7　Changes of Bulk *EC* values in different soil depths on different treatments



注：阴影部分为沙穴种植。

图8 不同处理下土壤Bulk EC时空分布

Fig. 8 Temporal and spatial distribution of Bulk EC in soils on different treatments

同深度土壤相对脱盐率差异相对较大，深度>20 cm脱盐效果最显著，这是因为在深度20 cm为沙穴种植的试供土壤与砂土交界处，L处理与C处理粉粒和黏粒含量高，换沙增加土壤孔隙度，使土壤盐分淋洗作用最为显著。

3 讨 论

本研究发现，细沙置换原状土后土壤含水率存在差异，关键是因沙穴是改变原状土种植结构下土壤持水性能，影响土壤水分迁移、再分布及土壤中滞留时间的根本原因[18]，与此同时，对不同土质原状土壤含水量的改善效果不一，其对黏壤土的根系层土壤水分状况改善效果显著，尤其在20~25 cm土层含水率等值线较密，含水率梯度较大，在空间上变化剧烈。这是因细沙与黏壤土间土壤质地差异而引起的土壤水分入渗性能发生改变，黏壤土由于其黏粒含量高，土壤表皮龟裂及板结现象严重，水分入渗性能较差，而利用细沙进行客土置换后，将下层与表层土壤气相贯通，水分通过异质土壤间大孔隙易向深层入渗，土壤内优先流和沟道效应增强[6]，增加根系层水分输移能力，谭利军等[19-20]通过室内外覆砂措施对土壤水分运移的研究中发现，在灌溉或降雨后，水分通过覆沙部分迅速向下入渗，水蒸气在细沙土体内孔隙中移动缓慢，向气压梯度小的土壤表层迁移速率随之降低，杜社妮等[21-22]研究发现，土壤定植填沙能够切断土壤的毛细管，减少下成土壤水分向上层土壤的补给量，提高蒸发"无效水"向"有效水"的转化，故客土填沙能减少表层土壤水分的蒸发，进一步加快盐渍黏壤土的改良过程。砂壤土及粉壤土的砂粒和粉粒含量较高，土壤入渗性能好，沙穴种植的土壤水分更易向深层下渗，造成根系层土壤水分损失，降低土壤持水性。

细沙置换原状土后土壤温度存在差异，关键是因沙穴种植下，细沙与原状土间颗粒组成间不同，将对土壤热性质产生影响，对比原状黏壤土，沙穴种植下土壤温度在生育初期存在显著差异，尤其在移栽期，SC处理平均增温了3.47 ℃，有效提高原状黏壤土生长初期内土壤温度，为幼苗生长发育提供良好的环境条件，在生育中后期，沙穴种植对黏壤土温度变幅较小。这是因为土壤温度受土壤颗粒、水分及大气温度等因素影响，李毅等[23]研究表明，导热率因土壤砂粒含量不同表现出差异，砂粒含量越大，导热率也高。在作物生长初期，在相同灌水

表5　不同处理在5 cm、20 cm、35 cm深度处土层脱盐率

Tab. 5　Desalination rate of soil layer at 5 cm, 20 cm and 35 cm depth on different treatments

处理	土层深度/cm	土壤*EC*值/(dS·m⁻¹)			脱盐率/%	相对脱盐率/%
		初始	生育期末	变化量		
S	5	0.18±0.002	0.19±0.001	−0.01±0.003	−5.56d(−1.98,+2.02)	−
	20	0.14±0.004	0.20±0.010	−0.12±0.010	−42.86d(−4.58,+4.86)	−
	35	0.22±0.011	0.25±0.024	−0.02±0.024	−10.05d(−9.74,+10.77)	−
SS	5	0.14±0.003	0.11±0.005	0.03±0.005	21.43a(−3.92,+4.08)	26.99(−5.90,+6.10)
	20	0.13±0.004	0.1±0.007	0.03±0.007	25.23b(−5.83,+6.19)	68.09(−10.40,+11.05)
	35	0.25±0.003	0.24±0.015	0.01±0.015	2.79c(−5.78,+5.90)	12.84(−15.52,+16.66)
L	5	0.58±0.030	0.83±0.035	−0.25±0.035	−43.02f(−5.56,+5.66)	−
	20	2.45±0.036	3.39±0.067	−0.94±0.067	−38.29d(−2.15,+2.21)	−
	35	5.59±0.020	6.25±0.032	−0.67±0.032	−11.96e(−0.53,+0.53)	−
SL	5	0.13±0.005	0.11±0.010	0.02±0.010	16.25b(−7.69,+8.33)	59.27(−13.26,+13.99)
	20	0.19±0.004	0.13±0.006	0.06±0.006	29.85a(−3.92,+4.08)	68.14(−6.07,+6.29)
	35	1.09±0.035	0.96±0.093	0.12±0.093	11.32b(−8.61,+9.19)	23.28(−9.14,+9.72)
C	5	0.23±0.018	0.28±0.021	−0.06±0.021	−24.33e(−6.44,+7.56)	−
	20	0.86±0.009	0.88±0.017	−0.02±0.017	−2.33c(−1.98,+2.02)	−
	35	1.88±0.069	2.04±0.083	−0.16±0.083	−8.74d(−3.95,+4.25)	−
SC	5	0.14±0.006	0.13±0.011	0.02±0.011	10.62c(−7.97,+8.63)	34.95(−14.41,+16.19)
	20	0.73±0.037	0.56±0.058	0.17±0.058	23.29b(−8.71,+9.63)	25.62(−10.70,+11.65)
	35	1.78±0.089	0.94±0.106	0.85±0.106	47.55a(−7.95,+8.78)	56.29(−11.9,+13.03)

注:不同小写字母表示处理间差异显著$P<0.05$。

量及大气温度下,利用细沙置换原状土后,沙穴内砂粒对土壤热扩散贡献高于原状土中的粉粒和黏粒,使土壤更易于达到热扩散率峰值,从而提高土壤传热能力[24],同时换沙处理后黏壤土深层土壤温度随着含水率的增加而增加,孙贯芳等[25]研究表明,土壤含水率增加,比热容值大,有利于初期土壤热量的吸收和保持,表明随着大气温度的变化,沙穴种植通过提高黏壤土水分含量,来增大土壤内部吸热及保温的能力,为加工番茄初期的生长发育及维持土壤温度稳定性创造良好条件。

细沙置换原状土后土壤盐分存在差异,关键是因沙穴种植下,细沙与原状土间颗粒组成不同,对土壤水分及温度迁移规律发生改变,二者将影响盐分的时空分布特征[26]。本研究发现,原状粉壤土盐分随着土层深度的增加呈积盐的趋势最为明显,利用细沙置换原状粉壤土及黏壤土后,耕作期间在深度>20 cm处根层土壤*EC*值显著降低,盐分淋洗效果显著,这是因为原状土与置换细沙的接触面(深度20 cm)存在较大连续孔隙,促进盐分随水向深层运动[27],周利颖等[28]研究表明,重度盐碱土中掺沙能够改善土壤结构面而影响土壤水分的运移和分布,土壤盐分的淋洗速度也会加快,沙穴种植通过提高土壤通气透水性能,降水或灌溉的水分更易下渗至较深土层,加快土表水分垂直方向的下渗速率,促进根层盐分的淋洗。同时,在土层深度>20 cm处,沙穴种植可显著提高原状粉壤土及黏壤土的有效水库容,增强土壤盐分缓冲性,减少和推迟表层盐分表聚,这与张翼夫等[29]研究结果一致。

4　结 论

基于野外土柱试验及滴灌条件下,以河套灌区杭锦后旗3种典型盐渍土壤质地(砂壤土、粉壤土、黏壤土)为研究对象,探讨沙穴种植对土壤水热盐迁移规律的影响,结果表明:

(1) 生育期内,沙穴种植下土壤含水率均呈现先增加后降低的变化趋势,与原状种植的S、L、C处理相比,沙穴种植SS、SL、SC处理下桶栽加工番茄全生育期根层含水率增加了−2.55%、−23.63%、12%,其中在20~25 cm深度处沙穴原状黏壤土的含水率相对增加了24.15%。

(2) 沙穴种植下土壤温度变化趋势与气温变化

保持一致，在生育初期，沙穴处理下黏壤土土壤温度增加了3.64 ℃，生育中、后期在深度20 cm以下温度变幅最小，沙穴处理对原状黏壤土种植相对保持土温变化的稳定及为作物生长初期提供良好生长环境。

（3）受土壤水分及温度耦合的影响，沙穴种植大大降低了深度20 cm以下土壤盐分，其中细沙置换原状黏壤土的相对脱盐率最大为56.29%，对提高深层土壤盐分的淋洗效果最为显著。

研究表明，沙穴种植可有效提高原状黏壤土的水分入渗，降低土温波动变幅及促进深层根系层盐分淋洗，而对原状粉壤土和砂壤土的改善效果不理想，在该区土壤质地为黏壤土的荒地可采取"滴灌+沙穴"种植方式对盐渍土壤进行改良，试验结果对河套灌区杭锦后旗盐渍黏壤土的开发利用有一定参考价值。本次研究只针一维空间下沙穴种植对不同土质原状土在时间尺度土壤水热盐的迁移规律的进行分析，今后可深入研究沙穴种植下在多维时空间尺度上对土壤理化性质、作物生理指标、根系生长情况及经济效益等的影响。

参考文献(References):

[1] 张利华. 基于ALOS影像的内蒙古杭锦后旗土地盐渍化程度分级[J]. 国土资源遥感, 2015, 27(1): 121–126. [Zhang Lihua. Study of land salinization of Hanggin Rear Banner in Inner Mongolia based on ALOS image[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2015, 27(1): 121–126.]

[2] 陈丽娟, 冯起, 王昱, 等. 微咸水灌溉条件下含黏土夹层土壤的水盐运移规律[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 44–51. [Chen Lijuan, Feng Qi, Wang Yu, et al. Water and salt movement under saline water irrigation in soil with clay interlayer [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(8): 44–51.]

[3] 安永清, 屈永华, 高鸿永, 等. 内蒙古河套灌区土壤盐碱化遥感监测方法研究[J]. 遥感技术与应用, 2008, 23(3): 316–322, 243. [An Yongqing, Qu Yonghua, Gao Hongyong, et al. Supervising the salted land distribution of Hetao irrigation area in Inner Mongolia by using remote sensing[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2008, 23(3): 316–322, 243.]

[4] 王学全, 高前兆, 卢琦, 等. 内蒙古河套灌区水盐平衡与干排水脱盐分析 [J]. 地理科学, 2006, 26(4): 4455–4460. [Wang Xuequan, Gao Qianzhao, Lu Qi, et al. Salt-water balance and dry drainage desalting in Hetao irrigation area, Inner Mongolia[J]. Scientia Geographica Sinica, 2006, 26(4): 4455–4460.]

[5] 张体彬, 展小云, 康跃虎, 等. 浅层填沙滴灌种植枸杞改良龟裂碱土重度盐碱荒地研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(10): 139–149. [Zhang Tibin, Zhan Xiaoyun, Kang Yuehu, et al. Amelioration of high saline-sodic wasteland of takyric solonetz by cropping *Lycium barbarum* L. with drip irrigation and shallow sand-filled niches[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 139–149.]

[6] Arbel Berezniak, Alon Ben-Gal, Yael Mishael, et al. Manipulation of soil texture to remove salts from a drip-irrigated root zone[J]. Vadose Zone Journal, 2018, 17(1): 1–11.

[7] Liu Anqi, Qu Zhongyi, Nachshon Uri. On the potential impact of root system size and density on salt distribution in the root zone[J]. Agricultural Water Management, 2019, 234. DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106118.

[8] 孙慧慧, 屈忠义, 王凡, 等. 沙穴种植对盐碱土壤水盐运移和番茄生长特性的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 230–235. [Sun Huihui, Qu Zhongyi, Wang Fan, et al. Impact of sand cave planting on water and salt transport and tomato growth characteristics in saline-alkali soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(1): 230–235.]

[9] 薛铸, 万书勤, 康跃虎, 等. 龟裂碱地沙质客土填深和秸秆覆盖对作物生长的影响[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(1): 38–41. [Xue Zhu, Wan Shuqin, Kang Yuehu, et al. Effect of sand-filled depth and straw mulching on crops growth in Takyric Solonetz[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(1): 38–41.]

[10] 薛铸, 万书勤, 康跃虎, 等. 龟裂碱地沙质客土填深对蔬菜作物生长的影响[J]. 节水灌溉, 2014(1): 5–8. [Xue Zhu, Wang Shuqing, Kang Yuehu, et al. Effect of exotic sandy soil depth on vegetable crops growth in takyric solonetz[J]. Water Saving Irrigation, 2014(1): 5–8.]

[11] 赵萍, 张晓黎, 孙殿明. 影响加工番茄生长发育的主要气象灾害探析[J]. 现代农业科技, 2007(23): 13. [Zhao Ping, Zhang Xiaoli, Sun Dianming. Analysis on the main meteorological disasters affecting the growth and development of processing tomato[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2007(23): 13.]

[12] 包刚, 吴琼, 阿拉腾图雅, 等. 近30年内蒙古气温和降水量变化分析[J]. 内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版), 2012, 41(6): 668–674. [Bao Gang, Wu Qiong, Alatengtuya, et al. Changes in tmperature and precipitation during past 30 year in Inner Mongolia [J]. Journal of Inner Mongolia Normal University(Natural Science Edition), 2012, 41(6): 668–674.]

[13] 张坤, 刁明, 景博, 等. 不同灌水量与灌水频率对加工番茄根系生长和产量的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(1): 83–89. [Zhang Kun, Diao Ming, Jing Bo, et al. Influence of irrigation quota and frenquency on root growth and yield of processing tomato [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, 38(1): 83–89.]

[14] 王晓霞, 楚金娥. 奎屯垦区加工番茄高产栽培技术[J]. 种子世界, 2009(8): 42–43. [Wang Xiaoxia, Chu Jinge. High yield cultivation techniques of processing tomato in Kuitun Reclamation Area [J]. Seed World, 2009(8): 42–43.]

[15] 黄敏, 宋梅, 布卡·欧尔娜, 等. 奎屯垦区加工番茄机械采收优质高产栽培关键技术[J]. 新疆农业科技, 2020(4): 25−26. [Huang Min, Song Mei, Buka Ouerna, et al. Key cultivation techniques of high quality and high yield of processing tomato by mechanical harvesting in Tunken area[J]. Xinjiang Agricultural Science and Technology, 2020(4): 25−26.]

[16] 付强. 奎屯垦区加工番茄高产栽培技术[J]. 新疆农垦科技, 2016, 39(5): 28−29. [Fu Qiang. High yield cultivation techniques of processing tomato in Kuitun reclamation area[J]. Xinjiang Farm Research of Science and Technology, 2016, 39(5): 28−29.]

[17] 李炳文. 山东玉米[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2011: 60−61, 300−302. [Li Bingwen. Shandong Maize[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2011: 60−61, 300−302.]

[18] 李王成, 冯绍元, 康绍忠, 等. 石羊河中游荒漠绿洲区土壤水分的分布特征[J]. 水土保持学报, 2007, 21(3): 138−143, 157. [Li Wangcheng, Feng Shaoyuan, Kang Shaozhong, et al. Distribution characteristics of soil water in hungriness region in middle reaches of Shiyang River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(3): 138−143, 157.]

[19] 谭军利, 王西娜, 田军仓, 等. 不同微咸水灌水量条件下覆砂措施对土壤水盐运移的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(17): 100−108. [Tan Junli, Wang Xina, Tian Juncang, et al. Effect of gravel-sand mulching on movement of soil water and salts under different amounts of brackish water[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(17): 100−108.]

[20] Phuong Minh Nguyen, Jan De Pue, Khoa Van Le, et al. Impact of regression methods on improved effects of soil structure on soil water retention estimates[J]. Journal of Hydrology, 2015, 525: 598−606.

[21] 杜社妮, 于健, 耿桂俊, 等. 定植孔密封方式对土壤水热盐及番茄苗存活率的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 110−116. [Du Sheni, Yu Jian, Geng Guijun, et al. Effects of planting hole sealing methods on soil moisture, temperature, salinity and survival rate of tomato seedling [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(12): 110−116.]

[22] 杜社妮, 白岗栓, 于健, 等. 沙封覆膜种植孔促进盐碱地油葵生长[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 82−90. [Du Sheni, Bai Gangshuan, Yu Jian, et al. Planting hole sealed by sand promoting growth of oil sunflower in saline-alkaline fields mulched with plastic film [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(5): 82−90.]

[23] 李毅, 邵明安, 王文焰, 等. 质地对土壤热性质的影响研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 62−65. [Li Yi, Shao Mingan, Wang Wenyan, et al. Influence of soil texture on the thermal properties[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(4): 62−65.]

[24] 吕雯, 孙兆军, 陈小莉, 等. 地膜秸秆复合覆盖改善龟裂碱土水盐特性提高油葵产量[J]. 农业工程学报, 2018, 34(13): 125−133. [Lyu Wen, Sun Zhaojun, Chen Xiaoli, et al. Plastic film and straw combined mulching improving water and salt characteristics of Takyr Solonetzs and yield of oil sunflower[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(13): 125−133.]

[25] 孙贯芳, 屈忠义, 杜斌, 等. 不同灌溉制度下河套灌区玉米膜下滴灌水热盐运移规律[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12): 144−152. [Sun Guanfang, Qu Zhongyi, Du Bin, et al. Water-heat-salt effects of mulched drip irrigation maize with different irrigation scheduling in Hetao irrigation district[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(12): 144−152.]

[26] 田德龙, 侯晨丽, 徐冰, 等. 苜蓿对农田耗水过程与盐分变化的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 291−301. [Tian Delong, Hou Chenli, Xu Bing, et al. Effect of Alfalfa on water consumption process and salt changes in fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 291−301.]

[27] 张桉赫, 丁建丽, 王敬哲, 等. 干旱区绿洲盐渍土粒径分布单重分形和多重分形特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(2): 314−322. [Zhang Anhe, Ding Jianli, Wang Jingzhe, et al. Fractal and multifractal analysis on saline soil particle size distribution in arid oasis [J]. Arid Zone Research, 2019, 36(2): 314−322.]

[28] 周利颖, 李瑞平, 苗庆丰, 等. 河套灌区不同掺沙量对重度盐碱土壤水盐运移的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(10): 116−123. [Zhou Liying, Li Ruiping, Miao Qingfeng, et al. Effects of different sand ratios on infiltration and water-salt movement of heavy saline-alkali soil in Hetao irrigation area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(10): 116−123.]

[29] 张翼夫, 李洪文, 胡红, 等. 打孔灌沙促进漫灌下盐碱土水分下渗提高脱盐效果[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 76−83. [Zhang Yifu, Li Hongwen, Hu Hong, et al. Punching and filling sand method increasing water infiltration and desalting rate of saline-alkali soil under flooding irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(6): 76−83.]

Effect of planting tomato in sand cave on water, heat and salt transport in different saline soil in Hanggin Rear Banner

HE Jing, QU Zhongyi, LIU Xia, LIU Zuting, SUN Yule

(Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China)

Abstract: There are many differences in the water infiltration, temperature, and salt content of the saline alkali soil in the Hetao irrigation district of Hanggin Rear Banner, which leads to different effects on soil improvement. This study aimed to examine the transport of soil moisture, temperature, and salt in different soil by “sand cave” planting tomatoes in saline soil by setting sand caves on three typical soils (sandy loam, silty loam, and clay loam) in the soil column. The results showed that sand cave planting has different effects on the distribution of water, heat, and salt in different soils. Sand cave planting significantly improves the water infiltration performance of silty clay loam soil, it increases the area and moisture content of root layer soil, and it can be increased by 24.15% at a depth of 20−40 cm. However, it reduced the water holding capacity of sandy loam and silty loam soil, and the water content of the soil profile was dry in the upper part and wet in the lower part. The temperature of undisturbed clay loam increased by 3.64 °C at the early stage of crop growth ($P<0.05$). These results show that there was no significant change in the temperature of sandy loam soil and silty loam soil, and the soil temperature showed a downward trend with the change in air temperature in the later growth stage. Additionally, the sand cave structure had a leaching effect on soil salt, the salt leaching effect of silt loam and clay loam was significant ($P<0.05$) at a depth of >20 cm, and the average relative desalination rate was 23.28% and 56.29%, respectively. Based on a comprehensive analysis of the law of water, heat, and salt transport of saline alkali soil in different soils by sand cave planting, it is concluded that among the three typical saline alkali soil in Hanggin Rear Banner, clay loam is the most suitable soil for sand cave planting. The research results inform the use of water- saving irrigation and the improvement of clay, saline soil to enable sustainable development of agricultural saline soil planting in arid areas.

Keywords: sand cave; saline soil; Hanggin Rear Banner; soil texture; water movement; temperature change; salt leaching; processing toamto